

EINSPARPOTENZIALE DURCH LASTVERSCHIEBUNG UND BIDIREKTIONALES LADEN IN LKW-DEPOTS

Fabio FRANK^{(*)1}, Till GNANN¹, Steffen LINK¹, Patrick PLÖTZ¹

Einleitung

Smartes und bidirektionales Laden für schwere Nutzfahrzeugflotten ist bislang wenig erforscht. Biedenbach und Strunz [1] analysieren Einsparpotenziale bei Ladekosten durch optimiertes unidirektionales und bidirektionales Laden in Kombination mit Spotmarkthandel, berücksichtigen dabei jedoch nur Energiekosten und keine Infrastrukturinvestitionen. Frank *et al.* [2] errechnen Einsparpotenziale bei laufenden Kosten und Infrastruktur durch optimierte Lastverschiebung, betrachten aber nur ein beispielhaftes Depot mit vereinfachten Fahrprofilen und kein bidirektionales Laden. In dieser Arbeit werden die Vollkosten des Depotladens, bestehend aus Energiekosten sowie annualisierten Infrastrukturinvestitionen, für verschiedene unidirektionale und bidirektionale Ladestrategien verglichen. Dabei werden die folgenden Forschungsfragen adressiert:

- 1) Welche Kostensenkungen können durch eine optimierte Steuerung der Ladevorgänge in Lkw-Depots erzielt werden?
- 2) Welche zusätzlichen Einsparpotenziale bietet das bidirektionale Laden gegenüber dem optimierten unidirektionalen Laden in Lkw-Depots?
- 3) Wie beeinflussen unterschiedliche Netzentgelttarife die Wirtschaftlichkeit von bidirektionalem Laden in Lkw-Depots?

Während die genannten existierenden Untersuchungen sich jeweils auf eine Lkw-Flotte und einen Netzentgelttarif fokussieren, analysiert diese Arbeit mehrere Flotten und Netzentgeltszenarien, um robuste Ergebnisse bezüglich der Einsparpotenziale (Fragen 1 und 2) sowie zum Einfluss der regional unterschiedlichen Netzentgelttarife in Deutschland (Frage 3) zu erhalten.

Daten und Methodik

Energiekosten sowie Infrastrukturinvestitionen werden als Zielfunktion eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblems modelliert. Nebenbedingungen stellen sicher, dass die Batteriekapazität der Fahrzeuge und die maximalen Leistungen der Ladepunkte zu jedem Zeitpunkt eingehalten werden und dass vor jeder Abfahrt ausreichend Energie geladen wurde, um den Fahrverbrauch bis zur Wiederankunft im betrachteten Depot zu realisieren. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Inputparameter und Entscheidungsvariablen des aufgebauten Modells. Die zeitliche Auflösung des Modells beträgt 15 Minuten.

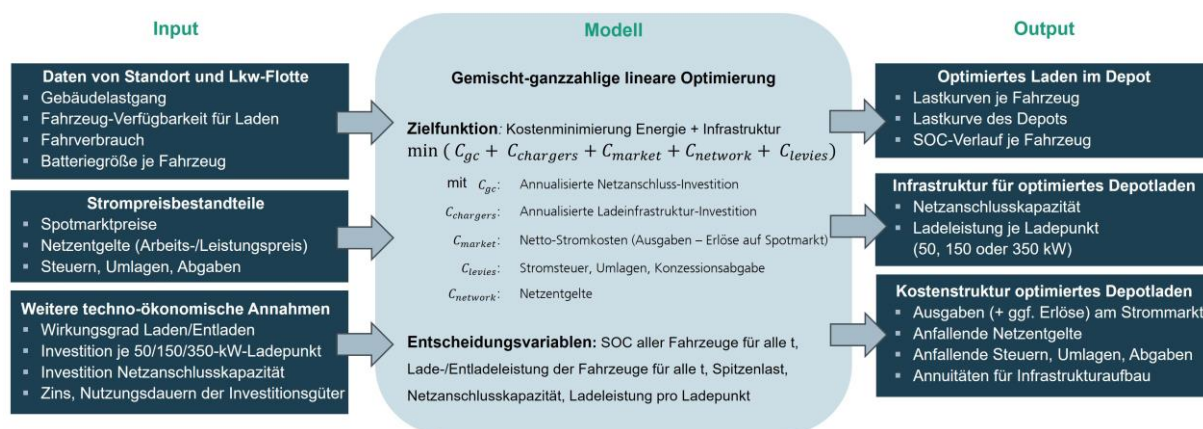


Abbildung 1: Modellüberblick

¹ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe, Deutschland, +49 721 6809-458, fabio.frank@isi.fraunhofer.de, <https://www.isi.fraunhofer.de/>

Mithilfe des Modells werden drei Ladestrategien optimiert: (1) *unidirektional* (optimiertes gesteuertes Laden) (2) *vehicle-to-building* (V2B, optimiertes bidirektionales Laden der Fahrzeuge, keine Rückspeisung vom Depot ins Netz) (3) *vehicle-to-grid* (V2G, optimiertes bidirektionales Laden inkl. Rückspeisung für Arbitrage auf dem Spotmarkt). Diesen werden zwei Referenzstrategien gegenübergestellt: (4) *ungesteuert* (Laden mit voller Leistung ab Ankunft) sowie (5) *flach* (gleichmäßiges Laden zwischen Ankunft bis Abfahrt eines Fahrzeugs).

Grundlage der Analyse bilden Daten von fünf Depots in Deutschland aus dem Bereich der Lebensmittel- und Getränke Logistik. Der vorliegende Datensatz enthält die Standzeiten sowie simulierten Fahrverbräuche der 30-100 Lkw je Standort sowie die Lastgänge der angeschlossenen Gebäude (ggf. abzüglich lokaler PV-Erzeugung). Die im Modell getätigten Investitionen im Depot umfassen den Aufbau von Ladeinfrastruktur (ein 50/150/350-kW-Ladepunkt je Lkw) sowie von Netzanschlusskapazität (Hardware [3] und Baukostenzuschuss [4]). Dynamische Strompreise werden auf Basis heutiger Day-Ahead-Marktpreise [5] sowie Steuern, Umlagen und Abgaben [6] zusammengesetzt. Hinzu kommen Netzentgelte, für die acht verschiedene Szenarien analysiert werden. Jedes Netzentgeltszenario basiert auf dem Mittelspannungstarif eines realen Verteilnetzbetreibers in Deutschland im Jahr 2025, bestehend aus einem Arbeitspreis (pro bezogener kWh) sowie einem Leistungspreis (zur Verrechnung mit der Jahresspitzenlast) und abhängig von der jährlichen Benutzungsstundenzahl. Die Arbeitspreise in den acht betrachteten Netzentgeltszenarien liegen im Bereich 3,3-9,3 ct/kWh (bei <2500 h) bzw. 0,7-3,7 ct/kWh (ab 2500 h), die Leistungspreise im Bereich 7-45 €/kW (<2500 h) bzw. 67-216 €/kW (ab 2500 h).

Erste Ergebnisse

Die Standzeiten der untersuchten Lkw-Flotten bieten die Flexibilität, Ladevorgänge zu verschieben und die Fahrzeuge als Speicher zu nutzen. Durch die Lastverschiebung werden günstigere Strompreise ausgenutzt und Spitzenlasten am Netzanschlusspunkt reduziert, was zu einer erheblichen Senkung der anfallenden Netzentgelte führt. Bereits eine simple Lastglättung ohne Optimierung (flache Strategie) kann durchschnittlich 2 ct je genutzter kWh Strom im Depot gegenüber dem gänzlich ungesteuerten Laden einsparen. Eine optimierte Lastverschiebung führt zu Einsparungen von 3-8 ct/kWh, das Ausnutzen von V2G kann weitere 1-3 ct/kWh ermöglichen. Bidirektionales Laden ohne Einspeisung ins Netz (V2B) zeigt hingegen nur minimale Einsparpotenziale gegenüber dem optimierten unidirektionalen Laden. Die Ausgestaltung der Netzentgelte (Höhe von Leistungs- und Arbeitspreisen) beeinflusst den Nutzen von bidirektionalem Laden. Bei hohen Leistungspreisen ist primär die Vermeidung von Spitzenlasten kosteneffizient, was den Arbitrage-Handel mit volatilen Spotmarktpreisen einschränkt.

Referenzen

- [1] F. Biedenbach und K. Strunz, "Multi-Use Optimization of a Depot for Battery-Electric Heavy-Duty Trucks," *WEVJ*, Jg. 15, Nr. 3, S. 84, 2024, doi: 10.3390/wevj15030084.
- [2] F. Frank, J. Oebel und T. Gnann, "Optimizing Charging Infrastructure for Truck Depots: Cost-Minimal System for Truck Charging Combined with PV and Battery Storage Systems," 2025, doi: 10.24406/PUBLICA-4844.
- [3] S. Kippelt, F. Probst, M. Greve und K. Burges, "Einfach Laden an Rastanlagen: Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs," NOW GmbH, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2022/09/Leitstelle_LKW-Netzstudie.pdf
- [4] Bundesnetzagentur, "Positionspapier zur Erhebung von Baukostenzuschüssen," Beschlusskammer 8, Nov. 2024. Zugriff am: 29. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK08/BK8_04_InfoRundschr/43_Leitfaeden/Downloads/Positionspapier_DL.pdf?__blob=publicationFile&v=7
- [5] Bundesnetzagentur | SMARD.de, "Marktdaten: Großhandelspreise DE/LU," 2025. Zugriff am: 29. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/home/downloadcenter/download-marktdaten/>
- [6] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. "BDEW-Strompreisanalyse Oktober 2025." Zugriff am: 29. November 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Strompreisanalyse_102025.pdf